

УДК 622.692.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

О.С. Тараєвський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,
e-mail: tzng@nimg.edu.ua

Розроблено методику, що дає можливість достовірно спрогнозувати залишковий ресурс роботи зварного з'єднання газопроводу та встановити оптимальний режим роботи компресорної станції. Розглянуті деякі аспекти механізму руйнування трубопроводів під дією циклічних навантажень та їх концентрації у зварному з'єднанні.

Ключові слова: втома, наводнення, концентратор напружень, зварне з'єднання, зварний шов, газопровід, статичне навантаження, низькочастотне навантаження

Разработана методика, позволяющая получить достоверный прогноз остаточного ресурса работы сварных соединений газопровода и установить оптимальный режим работы компрессорных станций. Рассмотрены некоторые аспекты механизма разрушения трубопроводов при действии циклических напряжений и их концентрации в сварном соединении.

Ключевые слова: усталость, наводораживание, концентратор напряжения, сварное соединение, сварной шов, газопровод, статическая нагрузка, низкочастотная нагрузка.

The procedure was developed, which enables to get a reliable prediction of the residual resource of work of welding annular couplings in gas pipelines and thus to establish an optimal working system of annular couplings. A few aspects of reasons for pipelines destruction under the impact of cyclic stresses and their concentration in annular couplings of a gas pipelines were examined.

Keywords: fatigue, inundation, stress concentrator, annular coupling, welding seam, gas pipeline, static stress, low – frequency stress

Надійність технічних пристроїв і систем – поняття, що має той або інший зміст залежно від цілей дослідження. У ДСТ 13377-75 «Надійність у техніці. Терміни й визначення» надійність визначена як «властивість об'єкта, що полягає в його здатності виконувати певні завдання в певних умовах». Інакше кажучи, надійність є збірним поняттям для позначення якості роботи об'єкта, тобто сукупності тих його властивостей, які з погляду дослідника, адекватно відображають його здатність виконувати поставлені завдання з урахуванням тих чинників, що приймаються до уваги. Вивчення надійності газопроводів починалося з розгляду вузькотехнічних аспектів – аналізу працездатності, безвідмовності й ремонтпридатності основного технологічного устаткування – трубопроводів і компресорних агрегатів [1]. Дослідження цього роду важливі, оскільки становлять інформаційну базу аналізу надійності газопроводу як складної технічної системи, що містить значну кількість різномірних елементів. Однак самі по собі ці дослідження не вирішують проблеми оцінки надійності газопроводу як цілого.

У плануванні й проектуванні газопроводів дослідження надійності проводиться з врахуванням наступних завдань:

- обґрунтування вибору головних проектних рішень;
- вибору діаметрів ниток трубопроводів, типу газоперекачувальних агрегатів (ГПА), кроку компресорних станцій (КС), технологічних схем ділянок і КС;

- оцінювання можливих втрат пропускної здатності і продуктивності через відмови устаткування;

- оцінювання надійності (імовірність) забезпечення попиту;

- вибору раціонального способу резервування з метою забезпечення необхідної надійності;

- визначення основних вимог до системи технічного обслуговування та ремонту;

- обґрунтувати вимоги до надійності подачі і якості підготовки газу, що подається в газопровід.

Як основний показник надійності газопроводу природно вибрати його пропускну здатність [1], тобто максимальну кількість газу, що може бути транспортована газопроводом за добу під час сталого режиму з дотриманням вимог по складу, якості підготовки й тиску газу в точках надходження та відбору за умови гарантованої подачі газу в необхідному обсязі в початкову точку газопроводу.

Пропускна здатність – інтегральна характеристика виробничої потужності газотранспортного підприємства. Вона є визначальним параметром під час вибору устаткування і технологічної схеми газопроводу. Від проектної (номінальної) пропускної здатності залежить рівень капіталовкладень, експлуатаційних і наведених витрат на спорудження та експлуатацію майбутнього газопроводу, а також основні статті потреби в матеріально-технічних ресурсах (кількість труб і агрегатів) і обсяг будівельно-монтажних робіт.

Пропускна здатність характеризує стан газопроводу в даний момент часу незалежно від стану інших елементів системи газопостачання. Продуктивність, тобто кількість газу, що реально передається або заплановано передати газопроводом, є характеристикою використання виробничих потужностей. Вона залежить не тільки від стану газопроводу, але і від коливань попиту, кількості газу в трубопроводах, якості керування та від стану інших елементів системи газопостачання. Для проектного газопроводу запланованої продуктивності обчислюють питомі показники ефективності: собівартість, фондівіддачу, питомі наведені витрати.

При проектуванні трубопроводу пропускну здатність зазвичай вважають постійною. Фактично вона змінюється, але за час під впливом різноманітних факторів. Проектна пропускна здатність – це пропускна здатність ідеального, тобто абсолютно надійного газопроводу, що працює в умовах, які не змінюються. Завдання розрахунку надійності полягає в дослідженні зміни реальної пропускної здатності залежно від частоти, глибини та тривалості відмов устаткування.

Введемо основні визначення, пов'язані з дослідженням надійності. Газопровід розглядаємо як систему послідовно з'єднаних ланок (об'єктів) – компресорних станцій і лінійних ділянок. Ланка є системою певним чином взаємодіючих елементів. Елемент – умовна частина ланки (одиниця устаткування, пристрій, сукупність пристроїв), розглянута як неподільне ціле. Наприклад, лінійна ділянка являє собою ланку газопроводу, елементами якого можуть служити одностанційні трубопроводи між сусідніми кранами, перемичками, запірні арматури, системи автоматики й телемеханіки.

Елементами КС можна вважати газоперекачувальні агрегати, апарати охолодження газу, трубопроводи-обв'язки, системи забезпечення нормального режиму роботи ГПА, блоки енергопостачання. При розрахунку надійності газопроводу компресорну станцію завжди варто розглядати як керовану ланку. У число керувань входять вибір схеми включення агрегатів, дроселювання, перепуск газу з виходу на вхід, вибір числа оборотів нагнітачів (для ГПА з газотурбінним приводом) та ін.

Що вважати елементом, залежить від цілей дослідження й стадії розробки. У передпроектних і планових розрахунках елементами ділянок вважають секції трубопроводів між двома перемичками, а елементами КС – газоперекачувальні агрегати. Більше складні моделі вимагають додаткової інформації і є інструментом спеціальних досліджень надійності.

Елемент вважається справним, якщо: а) він може бути використаний у технологічному процесі; б) його параметри перебувають у встановлених нормах меж. Якщо останнє не виконується, то говорять про стан часткової відмови. Якщо не виконується пункт «а», то елемент вважається що відмовив. У передпроектних і проектних розрахунках часткові відмови елементів не враховуються.

Працездатний елемент перебуває або під навантаженням, або в резерві. Елемент, що відмовив, надходить у систему обслуговування. Відключення елемента для аварійного або профілактичного ремонту зменшує надійність газопроводу в тому розумінні, що або приводить безпосередньо до зниження пропускної здатності, або збільшує ймовірність її зниження.

Станом ланки називається комбінація станів його елементів. Стан i -го ланки можна описати такими способами: 1) за допомогою цілочисельного параметра x_i номер, що вказує, даного стану в безлічі можливих; 2) за допомогою вектора, j -а компонента якого визначає стан j -го елемента (якщо безліч можливих станів незліченне). Нижче використається тільки перший спосіб.

Станом газопроводу з N ланками називається вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, де x_i — параметр стану i -го ланки. Кожному стану x газопроводу відповідає значення пропускної здатності $q(x)$. Ця залежність має складний характер.

Газопровід є керованою технічною системою з нерівномірно розподіленою резервною потужністю, тобто надлишковою пропускну здатністю лінійних ділянок і запасом регулювання режиму на КС. На відміну від таких об'єктів, як системи радіоелектроніки, для яких розроблені розвинені моделі надійності [3] і в які відмова нерезервованого елемента викликає відмову системи, відмова елемента газопроводу приводить лише до зміни гідравлічного режиму й, можливо, до деякого зниження пропускної здатності.

Складний вид резервування газопроводу не укладається в класичні схеми, і тому пряме перенесення цих моделей і показників надійності на системи газопостачання є невиправданим.

Процес зміни станів елементів, ланок і газопроводу має випадковий характер. Можливі два підходи до його вивчення. По-перше, до функціонування газотранспортної системи можна застосувати модель випадкового векторного процесу, компоненти якого – випадкові функції, що описують зміну стану ланок у часі. У теорії ймовірностей розглядаються різноманітні моделі випадкових процесів, які можуть бути застосовані до широкого класу явищ, але в кожній з них потрібно прийняти певні допущення. Природно, що чим більше твердим є допущення, тим легше одержати кінцевий результат.

Для практичних розрахунків надійності в рамках цього підходу щоб уникнути математичних ускладнень доводиться прибігати до моделі процесу, тобто такого стаціонарного випадкового процесу, про статистичні властивості якого можна судити по одній реалізації кінцевої тривалості, тобто за спостереженням за дійсним поведінням на деякому відрізку часу. Гіпотезу ергодичності важко перевірити формальними методами, і для її використання повинні існувати які-небудь здорові інтуїтивні підстави.

Цей підхід сполучений зі значними труднощами при його практичному використанні. Головна з них полягає в тому, що доводиться розглядати реалізації випадкових процесів дуже великої тривалості, щоб правильно оцінити вплив аварійних ситуацій, що мають малу ймовірність появи. Зневажити такими ситуаціями звичайно не можна, тому що їхнє число велике й ймовірність виникнення однієї з них може досягати помітної величини.

При другому підході ігнорується залежність стану газопроводу від реального часу й розглядається поведінка системи на нескінченно вилученому інтервалі часу тривалості T , причому вивчаються тільки усереднені характеристики процесу. Пропускна здатність газопроводу стає випадковою величиною — функцією випадкового вектора стану газопроводу. Ймовірність стану елемента, ланки й газопроводу можна інтерпретувати як сумарну частку часу, протягом якого об'єкт перебуває в даному стані. Наприклад, якщо P_0 — ймовірність роботи газопроводу за проектною схемою (коефіцієнт готовності газопроводу), то $P_0 \cdot T$ — середній час перебування газопроводу в справному стані за період T , тобто в стані зі справними робочими елементами. Ця ймовірність не зв'язується ні з початковим станом об'єкта, ні з передісторією процесу.

Другий підхід технічно й методично простіше. На ньому ми й зосередимо основну увагу. Обидва підходи дають однакові результати, якщо припустити, що процеси зміни станів елементів є незалежними, а дослідника цікавлять лише усереднені характеристики надійності за деякий інтервал часу у віддаленому майбутньому. У завданнях проектування й планування це природні допущення.

Для опису пропускної здатності як випадкової величини досить знайти її функцію розподілу або ряд розподілу. Значення функції розподілу $F(x)$ при будь-якому фіксованому x дорівнює ймовірності того, що пропускна здатність $q(x)$ менше x . Ряд розподілу пропускної здатності являє собою таблицю, у якій кожному можливому значенню q_k відповідає ймовірність $P_k = P\{q(x) = q_k\}, k = 0, 1, \dots, n$.

Введемо ще так звану функцію надійності, $R(x) = 1 - F(x)$, що вказує для кожного x ймовірність того, що $q(x) \geq x$. Функції $F(x)$ і $R(x)$ невід'язні, монотонні й визначені при будь-яких значеннях x , причому при $x \leq 0$ $F(x) = 0$, $R(x) = 1$, при $x > q_0$ $F(x) = 1$, $R(x) = 0$, де q_0 — номінальна пропускна здатність газопроводу.

Пропускна здатність є дискретною випадковою величиною, оскільки стану ланок являють собою цілочисельні випадкові величини. Однак число можливих станів газопроводу звичайно так велике, що нереально намагатися визначити всі значення пропускної здатності й ймовірності, що відповідають їм. Тому іноді дискретний розподіл заміняють безперервним. У цих випадках формули, засновані на використанні функції розподілу або функції надійності, залишаються справедливими, а рядами розподілів користуватися не можна.

Використання безперервних розподілів має ще й ту вигоду, що, наблизивши отриманий розподіл яким-небудь добре вивченим, можна досліджувати його властивості аналітично. Реальний шлях зменшення трудомісткості розрахунків полягає в тому, щоб обчислювати не сам розподіл пропускної здатності, а параметри його відомого закону, що наближає розподілу.

Серед показників надійності газопроводу найбільш важливими є середня пропускна здатність, що виражає математичним очікуванням випадкової величини q :

$$M[q] = \int_0^q x dF(x) \text{ або } M[q] = \sum_{k=0}^n P_k q_k, \quad (1)$$

і коефіцієнт надійності K_n , дорівнює відношенню $M[q]/q_0$. Величина $M[q]$ указує середню добову продуктивність газопроводу за умови повного завантаження, а q_0 — $M[q]$ дорівнює середній втраті пропускної здатності газопроводу через відмови встаткування. Добуток $TM[q]$ є максимум продуктивності Q газопроводу за період T , тобто $Q \leq TM[q]$. Ця величина збігається із продуктивністю, якщо газопровід працює з максимальним завантаженням і умови його роботи в період T не змінюються. У практиці проектування часто вважають, що ці припущення виконуються.

Облік надійності вносить істотні корективи в спосіб оцінки співвідношення між номінальною пропускною здатністю й продуктивністю. Дотепер і втрати пропускної здатності через відмови, і зниження продуктивності через сезонні коливання попиту враховувалися за допомогою коефіцієнта нерівномірності, значення якого визначалося експертним шляхом. Тепер відношення продуктивності до номінальної пропускної здатності виражається добутком двох коефіцієнтів — надійності й нерівномірності $K_{нер}$. Останній указує ступінь використання реальної пропускної здатності й тому повинен обчислюватися по формулі

$$K_{нер} = \frac{Q}{(TM[q])} = \frac{Q}{(TK_H q_0)}. \quad (2)$$

Якщо середня пропускна здатність дорівнює запланованій продуктивності, то це ще не гарантує надійного газопостачання. Якість постачання споживачів залежить не тільки від середньої подачі за період, але й від рівномірності подачі, відсутності різких коливань продуктивності. Важливо оцінити ризик (ймовірність) невиконання планових завдань по поставках газу й очікуваний дефіцит. Для цього використовується функція розподілу пропускної здатності газопроводу. Якщо, наприклад, запланувати продуктивність газопроводу за період T у обсязі Q , то ймовірність невиконання такого плану дорівнює $F(Q/T)$, а середній дефіцит складе

$$\int_{-\infty}^{Q/T} (Q - Tx) dF(x). \quad (3)$$

Для оцінки надійності газопостачання споживача корисно задати мінімально припус-

тиму величину добової подачі газу \bar{q}_{\min} , а мірою надійності газопостачання вважати ймовірність p виконання нерівності $q \geq \bar{q}_{\min}$, тобто $p = R(\bar{q}_{\min})$. Якщо, навпаки, фіксувати величину p , то обігом функції $R(x)$ можна знайти пропускну здатність \bar{q}_{\min} , що газопровід гарантує з ймовірністю p . Значення p можна інтерпретувати як норму надійності газопостачання споживачів і задавати для кожного споживача директивним шляхом. Тим самим буде визначений розрахунковий рівень реальної пропускної здатності газопроводу.

Фактичний попит, як правило, не дорівнює запланованому. Він залежить від багатьох факторів, у тому числі від погодних умов, і, отже, не може вважатися постійним.

Нехай $E(y) = P\{\bar{q} < v\}$ — функція розподілу попиту. Тоді надійність його забезпечення, тобто ймовірність події $q \geq \bar{q}$, дорівнює

$$\int_0^{\bar{q}_0} E(y) dF(y) = H. \quad (4)$$

За допомогою показника H можна глобально оцінити надійність газопостачання тих споживачів, для яких споживання характеризується нерівномірністю зміни в часі. Опис закономірності зміни попиту дає кумулятивна функція розподілу $y = f(t)$. Вона являє собою згладжений ряд упорядкованих по убуту значень попиту. Зворотна до неї функція $t = f^{-1}(y)$ вказує інтервал часу, у якому попит \bar{q} перевищує значення v . Якщо відношення t/T трактувати як ймовірність події $\bar{q} \geq y$, то функція розподілу попиту обчислюється по формулі

$$E(y) = 1 - \frac{1}{T} f^{-1}(y). \quad (5)$$

Таким чином, загальне завдання оцінки надійності газопроводу можна сформулювати як завдання побудови закону розподілу пропускної здатності. Показники надійності, які пропонуються в роботах [1, 4], легко обчислюються на підставі цих функцій.

Якщо протягом розглянутого періоду характеристики надійності елементів або умови функціонування не можна вважати незмінними, то період T розбивають на l періодів B ($l = 1, 2, \dots, l$), у яких, характеристики встаткування, умови експлуатації й режим обслуговування вважаються постійними. У цьому випадку відповідної функції для періоду T відшукуються як середні зважені по періодах t .

Висновок. Із проведеного аналізу випливає, що під час моделювання режимів роботи магістральних газопроводів неприпустимо зневажати гідравлічними втратами на тертя в рівнянні руху при будь-яких режимах. Нехтування членом, що враховує гравітаційні втрати, призведе до деякої похибки, яка залежить від профілю траси газопроводу та буде близькою до постійної в різних варіантах розрахунків. Нехтування інерційними втратами припустиме лише після попередньої оцінки режиму, що моделюється. При цьому зауважимо, що для квазістаціонарного турбулентного режиму величина інерційних втрат мізерна, а з розвитком нестационарності швидко зростає. Тому виникає необхідність певним чином оцінити ступінь нестационарності потоку з метою прогнозування величини інерційних втрат.

Література

- 1 Грудз В.Я. Обслуживание газотранспортных систем: учебное пособие / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тымкив, Е.И. Яковлев. — К.: УМК ВО, 1991. — 160 с.
- 2 Крижанівський Є.І. Визначення залишкового ресурсу роботи кільцевих зварних з'єднань газопроводів / Є.І.Крижанівський, О.С.Тараєвський // Науковий вісник Івано-Франківського національного університету нафти і газу. — 2005. — №1(10). — С.42-46.
- 3 Крижанівський Є.І. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу / Є.І.Крижанівський, О.С. Тараєвський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2004. — №3(12). — С.31-34.
- 4 Галиуллин З.Т.Интенсификация магистрального транспорта газа / З.Т. Галиуллин, Е.В. Леонтьев. — М.: Недра, 1991. — 272 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
14.07.10
Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.